

論文

ゲシュタルト崩壊と事象関連電位に関する研究

船 田 眞里子
橋 本 航

A Study on the Detection of Gestaltzerfall by Event-Related Potentials

FUNADA Mariko

HASHIMOTO Wataru

1. はじめに

ゲシュタルト崩壊（Gestaltzerfall）は、失認（一つの感覚を介して対象物を認知することができない障害）の一症候として1947年に報告¹⁾された現象である。その後、持続的注視によって健常者にも生じることが報告され、漢字の認知については「末梢的な視覚情報過程の順応・疲労に起因するものではなく、(注視対象の)部分を統合し、全体的形態を把握するパターン認知の高次過程において、持続的注視による機能低下が生じている可能性が示唆⁸⁾」された。また、漢字の持続的注視による漢字認知の遅延によりゲシュタルト崩壊の生起の推定⁵⁾などが行われている。

一方、事象と時間的に関連して惹起され、頭皮上から測定される電位に事象関連電位（Event-Related Potential、以下ERPと略称）^{9)~12)}がある。ERPは、医学、心理学⁹⁾、犯罪捜査、人間工学における生体指標⁴⁾、学習

の進捗評価⁶⁾ など幅広い分野で応用されている。ERPは、背景となる脳波に比べて振幅が小さいので、様々な計測手法が提案されているが、一般には刺激時点をそろえた脳波の加算平均^{9), 12)} により求められている。

本論文では、ERPを用いて、次の2つの仮説「ゲシュタルト崩壊の生起をERPで測定可能である」、「ERPでゲシュタルト崩壊過程を把握できる」を検証することを目的とした。両仮説とも、机上の証明が困難な仮説なので、実験により検証することを試みた。すなわちゲシュタルト崩壊前後の脳波を測定し、ERPを求め、その特徴値を用いて仮説の成否を実証的に考察した。またERPは個人差が大きいため、研究の取り掛かりとして単一事例研究⁷⁾ とした。第1仮説の検証にはゲシュタルト崩壊前後のERPの差を使用し、第2仮説の検証にはERPの頂点電位の特徴値を求めその変化によりゲシュタルト崩壊過程をそれぞれ定量的に示すことを試みた。

2. 実験方法と解析方法

2. 1 実験方法

- (1) **被験者**：実験に協力的な右ききの成人男性1名（22歳）とした。
- (2) **実験場所**：外界から遮断された研究室。実験時には実験への集中維持に配慮した。
- (3) **刺激の種類**：ゴシック体の平仮名46文字とした。刺激は縦9.0cm、横11.0cmで、眼球を動かさずに見える大きさである。フォントの種類は、事前実験で明朝体よりもゴシック体の方がゲシュタルト崩壊が生じ易いことが確認されたため、ゴシック体に決定した。
- (4) **刺激画像の表示時間**：19インチの画面の中央に刺激画像を1秒間、間に10ミリ秒の時間間隔をおいて表示した。この間、画面は白色とした。画面と目の距離が60～80cmとなる位置に被験者は腰掛けた。
- (5) **タスク**：被験者は画面に表示された文字を注視し、文字刺激表示時に表示された文字が文字として認識されている場合「0」を、認識できない場合「1」をテンキーから入力する。

- (6) **反復回数**：各文字に対して連続して40回反復した。この反復回数は、事前実験と被験者の集中力・負担を考慮して決定した。実際、平仮名では10回から30回の範囲でゲシュタルト崩壊が生じることが今回の実験では確認された。
- (7) **脳波**：脳波は日本光電社製のNeurofax EEG8310で、ハイカット周波数を60Hz、時定数を0.3秒、抵抗を約2k Ω とし、A/D変換ボードを挿入したgateway社のコンピュータG7-600を用いてリアルタイムで記録した。標準化周波数は1kHzとした。
- (8) **電極配置**：国際10-20法によるA₁A₂を基準電極とするFp₁、Fp₂、C₃、C₄の単極導出とした。

1回の実験で「あ」「い」「う」「え」「お」を母音にもつ各10個、または8個の平仮名について実験を行った。実験は、間に1週間空けて行った。

2. 2 解析方法

測定データについて次の処理を行いERPを測定した。

- (1) 適応型フィルタを用いて高周波雑音を低減し、3次曲線近似を用いて低周波雑音を低減し、データごとに標準化して $NEEG_i(t)$ (i :識別番号、 t :時間) を求めた。
- (2) $NEEG_i(t)$ を「0」が入力されたゲシュタルト崩壊状態でない群 B (before)、「1」が入力されたゲシュタルト崩壊状態の群 A (after) の2群にそれぞれ分割し、それぞれの加算平均により、ゲシュタルト崩壊前後のERPを求めた。
- (3) ゲシュタルト崩壊前後のERPの頂点電位の特徴値を求め、群 A 、 B を識別する判別分析を行った。
- (4) $NEEG_i(t)$ を文字ごとに移動平均し、ERPを求めた。求められた特徴値を判別関数に代入し、関数値を求めた。

3. 実験結果

3. 1 主観的ゲシュタルト崩壊

表1はゲシュタルト崩壊が生じるまでの刺激の反復回数である。すなわち、表中の値はゲシュタルト崩壊が生じたと主観的に認識するまでの刺激表示の反復回数である。「行」に関しては、「**あ**行」、「**な**行」ではゲシュタルト崩壊が生じるまでの回数が相対的に少なく、「**段**」については、「**あ**段」、「**い**段」で相対的に少ない。表中の全平均回数は19.5回であった。

刺激文字の画数とゲシュタルト崩壊が生じるまでの反復回数との相関係数を求めると、「**ら**行」では-0.88、「**な**行」では-0.79で最も相関が高い。全体の相関係数の平均は約-0.33で、「**ま**行」、「**や**行」を除く8個の行で相関係数は負であった。すなわち画数が多いほどゲシュタルト崩壊が生じるまでの回数が少ない結果となった。

ゲシュタルト崩壊では対象とする文字の形状が関係すると言われているが、画数は形状の複雑さを計測する一指標となると考えられる。

表1 主観的ゲシュタルト崩壊発生までの刺激反復回数

行 \ 段	あ段	い段	う段	え段	お段	平均
あ行	10	10	16	13	13	12.4
か行	13	21	22	20	17	18.6
さ行	19	22	29	24	22	23.2
た行	17	22	26	16	27	21.6
な行	11	15	13	23	24	17.2
は行	14	19	20	24	17	18.8
ま行	11	22	20	18	35	21.2
や行	20		14		23	19
ら行	23	18	26	18	28	22.6
わ行	27		16		18	20.3
平均	16.5	18.6	20.2	19.5	22.4	19.5

3. 2 ゲシュタルト崩壊前後のERP

図1、図2は第1実験日から第5実験日に測定された「あ段」から「お段」のそれぞれゲシュタルト崩壊前（群B）、後（群A）のERPである。横軸は刺激表示後の時間、縦軸は振幅である。図中の凡例の（ ）内の数値は各ERPを求めるのに使用した $NERP_i(t)$ の個数である。図1のERPにはP1、N1、P3、N3と呼ばれる正・負の電位が出現している。一方、ゲシュタルト崩壊後の図2のERPではP1、N1、P3、N3の各頂点電位と「あ、い、うの各段」ではP2、N2と呼ばれる頂点電位が出現している。また、図1の頂点電位に比べて図2の頂点電位の振幅が低い。

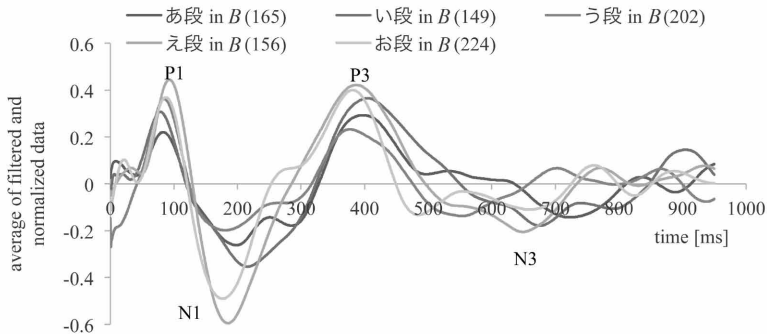


図1 第1実験日（あ段）から第5実験日（お段）までの群BのERP
（測定部位：Cz、凡例（ ）内はデータ数）

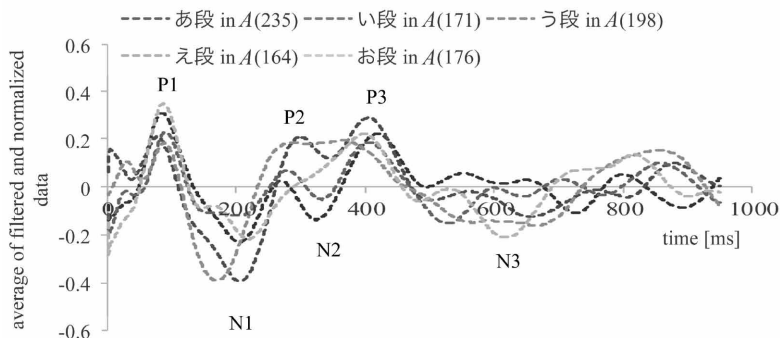


図2 第1実験日（あ段）から第5実験日（お段）までの群AのERP
（測定部位：Cz、凡例（ ）内はデータ数）

図1、図2は第1実験日から第5実験日に測定された「あ段」から「お段」のそれぞれゲシュタルト崩壊前後のERPである。横軸は刺激表示後の時間、縦軸は振幅である。図中の凡例の（ ）内の数値は各ERPを求めるのに使用した $NERP_i(t)$ の個数である。ゲシュタルト崩壊前の図1のERPにはP1、N1、P3、N3と呼ばれる正・負の電位が出現している。一方、ゲシュタルト崩壊後の図2のERPではP1、N1、P3、N3の各頂点電位と「あ、い、うの各段」ではP2、N2と呼ばれる頂点電位が出現している。また、図1の頂点電位に比べて図2の振幅が低電位である。

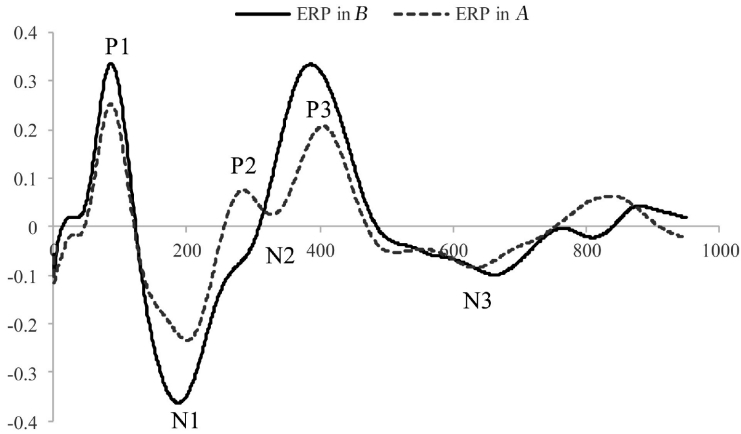


図3 ゲシュタルト崩壊前（群B、878個）、後（群A、962個）のERP

図3は全ての平仮名に関するゲシュタルト崩壊前後のERPである。群B（ゲシュタルト崩壊前）のデータ総数は878個、群A（ゲシュタルト崩壊後）の総数は962個で、それぞれの個数の $NERP_i(t)$ の加算平均により求めたERPである。群AのERPでは、P1、N1、P3、N3の各頂点電位の振幅が小さく、P2、N2の頂点電位が出現している。

3. 3 ERPの特徴値

ERPの特徴を表す変数としては、各頂点電位の振幅と潜時（刺激が与えられてから頂点電位が出現するまでの時間）がよく使用されている。そこで、これらの特徴値を用いて、群B、AのERPで出現しているP1、N1、P3に対する値をそれぞれ抽出し、以降の解析で用いることとした。P2、N2は出現しない場合があり、N3は他の頂点電位に比べ低振幅で、潜時のばらつきが大きいため解析対象から除いた。

表2、表3は測定部位Czのそれぞれ群B、群AのERPの特徴値である。変数 $AP1$ 、 $AN1$ 、 $AP3$ はそれぞれP1、N1、P3の振幅であり、 $P1$ 、 $N1$ 、 $P3$ は各潜時である。

表2 ゲシュタルト崩壊前のERPの特徴値（測定部位：Cz）

変数・ERP	あ段 in B	い段 in B	う段 in B	え段 in B	お段 in B	平均 in B
<i>AP1</i>	0.221	0.307	0.362	0.445	0.369	0.336
<i>AN1</i>	-0.262	-0.354	-0.199	-0.595	-0.491	-0.362
<i>AP3</i>	0.293	0.366	0.233	0.421	0.400	0.334
<i>P1</i>	84	80	86	94	88	87
<i>N1</i>	199	216	181	186	178	188
<i>P3</i>	398	406	378	388	382	387

表3 ゲシュタルト崩壊後のERPの特徴値（測定部位：Cz）

変数・ERP	あ段 in A	い段 in A	う段 in A	え段 in A	お段 in A	平均 in A
<i>AP1</i>	0.308	0.209	0.228	0.182	0.346	0.253
<i>AN1</i>	-0.228	-0.394	-0.121	-0.390	-0.218	-0.233
<i>AP3</i>	0.221	0.288	0.186	0.194	0.221	0.207
<i>P1</i>	86	78	91	89	88	87
<i>N1</i>	206	206	205	170	218	201
<i>P3</i>	420	405	405	367	399	406

3. 4 判別分析

各測定部位における表2、表3（Cz）と同様な値を用いて判別分析（SPSS 使用）を行い線形判別関数を求めた。測定部位Czの群B、群Aに対しそれぞれ次のような判別関数を得た。判別率は共に100%であった。このような判別関数をPz、C3、C4の各測定部位に関して求め、以下の解析を行った。内部データ（判別関数作成に使用したデータ）の判別率は全てCzと同様に100%であった。

表4 測定部位Czの群Bと群AのERPを判別する判別関数

変数	線形判別関数の係数		
	群Bの判別関数 z_B	群Aの判別関数 z_A	$z = z_B - z_A$
<i>AP1</i>	-249.834	-262.978	13.144
<i>AN1</i>	-1029.393	-1193.913	164.520
<i>AP3</i>	-2123.826	-2502.551	378.725
<i>P1</i>	9.797	10.285	-0.488
<i>N1</i>	1.770	2.214	-0.444
<i>P3</i>	5.709	6.158	-0.448
<i>constant</i>	-1497.723	-1746.893	249.170

3. 5 移動平均によるERPの変化

通常ERPを求めるには、20回程度の加算平均が必要であると言われている。一方今回の実験課題は非常に単純な課題である。また表1より10回前後からはほぼ30回でゲシュタルト崩壊が生じたことから、本研究では11個のデータの移動平均でERPを求め（*SERP*で表す）、1回の実験中のERPの変化を把握することとした。すなわち、形式的に書けば次式のとおりである。

$$SERP_j(t) = \frac{1}{11} \sum_{i=j-5}^{j+5} NERP_i(t) \quad (j = 6, 7, \dots, 35) \quad \cdots (1)$$

各 $SERP_j(t)$ に対し3.4節で述べた判別分析を行い表4と同様な $AP1 \sim P3$ の係数値を求めた。図4は測定部位Pz、刺激画像「ぬ」の場合の振幅 $AP1$ 、 $AN1$ 、 $AP3$ の値と、被験者の入力（主観的なゲシュタルト崩壊無：「0」、有：「1」）である。横軸は反復の回数、左縦軸が振幅で、右縦軸が入力の値を示している。ゲシュタルト崩壊前からゲシュタルト崩壊への変化が生じる反復回数で $P1$ 、 $N1$ 、 $P3$ の各振幅が低減している。これはゲシュタルト崩壊前と後で異なる $NERP_i(t)$ が出現し、その加算平均のため低振幅となったことが推定される。図5はPzで測定した「ぬ」に対する $SERP_j(t)$

の頂点電位の潜時 $P1$ 、 $N1$ 、 $P3$ の値である。また、被験者の入力および求めた Pz に関する判別関数の値を示している。 $P3$ の潜時の変化が入力の変化に対応し、判別関数の値と関係が深いことが示されている。

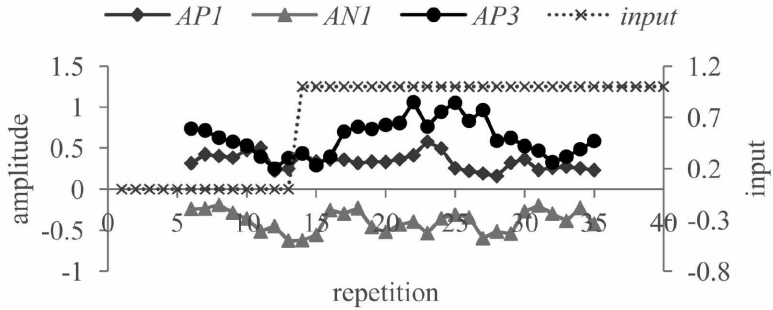


図4 文字「ぬ」に対する移動平均ERPの頂点電位の振幅 $AP1$ 、 $AN1$ 、 $AP3$ の値と被験者の入力（測定部位： Pz 、加算平均回数：10回）

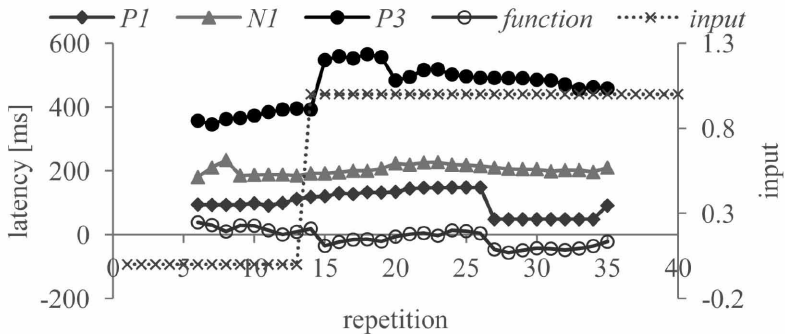


図5 文字「ぬ」に対する移動平均ERPの頂点電位の潜時 $P1$ 、 $N1$ 、 $P3$ の値、被験者の入力と判別関数の値（測定部位： Pz 、加算平均回数：10回）

4. 考察

実験結果を用いて2つの仮説について考察する。

まず第1の仮説「ゲシュタルト崩壊の生起をERPで測定可能である」について考察する。文字に関するゲシュタルト崩壊の測定では、同じ文字を切れ目なく見続けることが要求される。

ERPでは事象と脳波の対応付けの関係から刺激を見始める時点を決定しなければならない。本研究では、画像の切り替えに伴うハードウェアの制約による画面の切り替えを用いて、ERPを測定した。その結果ゲシュタルト崩壊の前後で異なるERPを測定した。すなわち、ゲシュタルト崩壊前では、高振幅のP1、N1、P3が出現し、崩壊後にはP2、N2と呼ばれる電位（図3）が出現し、各頂点電位の振幅は低振幅となり、P3の潜時は遅くなっている。

表5は群B、群AのERPの特徴値の差の検定結果である（刺激の種類は「あ段」）。測定部位により多少の差があるが、ほとんどの測定部位で有意水準5%で平均値に差があることが示された。特にP3の振幅AP3ではすべての測定部位で有意差が確認された。この結果は、ゲシュタルト崩壊前後の脳の判断・認知に関する高次機能で変化が生じており、それをERPの特徴値で、把握できることを示している。

以上の考察から第1仮説は、今回の被験者に対して成立することが示唆された。

表5 ゲシュタルト崩壊前後の状態でのERPの振幅と潜時のそれぞれの平均値の差（刺激の種類：あ段、有意水準5%で差があると認められたもの：*）

変数	測定部位			
	Cz	Pz	C3	C4
AP1	*		*	*
AN1				
AP3	*	*	*	*
P1	*			*
N1	*	*		*
P3	*			*

次に第2仮説「ERPでゲシュタルト崩壊過程を把握できる」について検討する。3.5節の図4、5から主観的なゲシュタルト崩壊の認識過程は、頂点電位の主にP3の振幅・潜時などで把握可能であることが示された。また、頂点電位の値を用いて判別分析し、線形判別関数を求め、その判別関数値によりゲシュタルト崩壊過程を数値で表現可能であった。例えば、図5の判別関数の値の変化はその例である。

図6の折れ線は「つ」の場合の全測定部位に関する移動平均ERPの判別関数値であり、×は被験者の入力を表している。判別関数値は相互に0.3～0.66の相関係数をもち、類似した変化をしている。正の値がゲシュタルト崩壊前であるとの判定であり、負の値は崩壊の状態であることを示している。主観的な崩壊の有無と関数値の間に対応を付けることができるが、「つ」の場合、時間的ずれが生じている。このデータは11個の移動平均によるERPの頂点電位の潜時と振幅の値を使用しているので、主観的な判定との差の一因はこのERPの測定法にあると考えられる。一方大脳活動の変化と主観的判断の間にも多少の時間的ずれが生じることも予測される。また、反復回数30回以降のERPではゲシュタルト崩壊からの回復状態であることが推定される。図7は移動平均ERPを用いてPzの判別関数の値を横軸に、C3の判別関数値を縦軸にとり、プロットしたものである。各判別関数値の組みは、主に第1象限と第3象限にプロットされ、双方の判別結果が一致していることが示されている。

以上のことから移動平均ERP ($SERP_j(t)$) とその特徴値を用いてゲシュタルト崩壊の過程を経時的に把握できることが今回の被験者に関して示唆された。

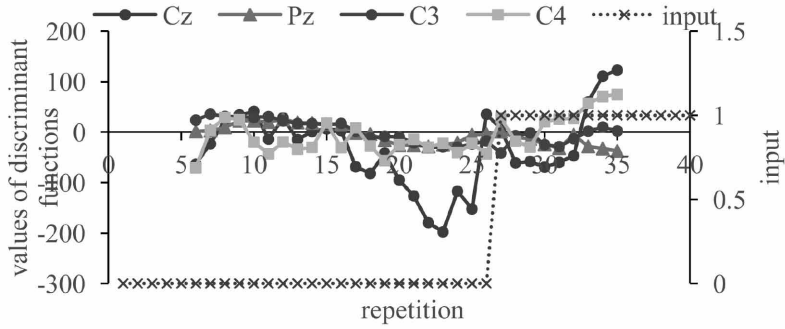


図6 文字「つ」に対する移動平均ERPの頂点電位を用いた場合の判別関数の値と
入力の値（測定部位：Cz、Pz、C3、C4、加算平均回数：10回）

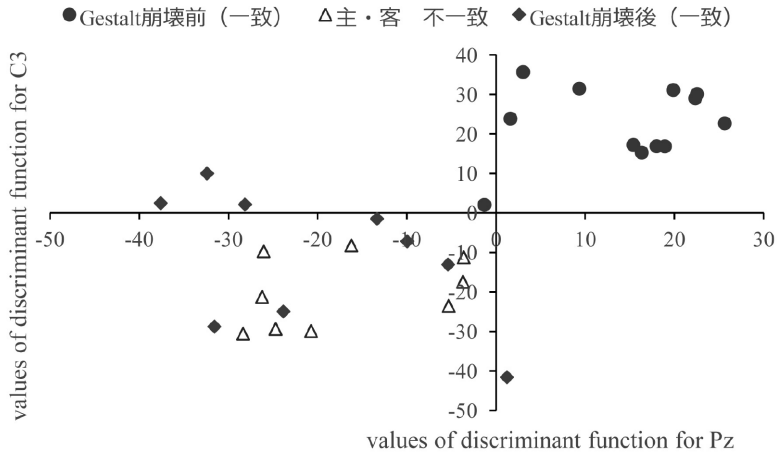


図7 文字「つ」に対するPz、C3の判別関数値によるプロット
（測定部位：Pz、C4、加算平均回数：10回）

5. まとめ

本研究の目的はゲシュタルト崩壊という現象をERPを用いて把握することであり、そのために2つの仮説「ERPでゲシュタルト崩壊の生起が測定可能である」、「ERPでゲシュタルト崩壊過程を把握できる」を検証した。ERPは本来、個人差の比較的大きな現象であることから、単一事例研究の手法を用いた。その結果、今回の実験方法ならびに被験者については、仮説は肯定的に検証された。今回使用した特徴値はERPの頂点電位だけであったが、脳波の分布とERPの頂点電位の形状を用いた解析に関してはHCII2017³⁾で報告予定である。

再現性の確認や、被験者を増やし検討することなどが今後の課題である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、白鷗大学教育学部教授仁平義明先生より貴重なご助言を賜った。ここに記し感謝申し上げたい。

引用文献・参考文献

- 1) C. Faust, : “Über Gestaltzerfall als Symptom des parieto-occipitalen Übergangsgebiets bei doppelseitiger Verletzung nach Hirnschuß”. *Nervenarzt* (18) : 103-115, 1947.
- 2) M. Funada, T. Funada, Igarashi Y.: Discrimination in good-trained brain states for brain computer interface, HCI2015, LNCS9183, Springer, pp. 187-198, 2015.
- 3) M.Funada, T. Funada, Y.Igarashi : “Dynamic Changes of Event-Related Potentials in the Gestaltzerfall Phenomenon -Using the Multi-Data Selecting and Averaging Method -”, HCII2017 (印刷中), 2017.
- 4) 船田忠他 : “m-DSAMを用いた事象関連電位による暗記反復課題の特徴付け”, 人間工学誌特別号, Vol.51, pp. 168-169, 2015.
- 5) M. Funada, T. Funada, M. Shibukawa, K.Akahori: “Quantification and Analysis of the Efficiency of Iterative Learning by Using Event-Related Potentials, *Educ. Technol. Res.* 35, 193-113, 2012.

- 6) 二瀬由理・行場次朗：持続的注視による漢字認知の遅延：ゲシュタルト崩壊現象の分析，*心理学研究*，第67巻第3号，pp.227-231，1996.
- 7) 長谷川芳典：心理学研究における実験的方法の意義と限界(4) 単一事例実験法をいかに活用するか，*岡山大学文学部紀要*，48，31-47，2007.
- 8) 永野俊・梶真寿・森見徳：視覚系の情報処理，*心理学・神経科学・情報工学からのアプローチ*，啓学出版，1993.
- 9) 入戸野宏：心理学のための事象関連電位ガイドブック，北大路書房，京都，2005.
- 10) 丹羽真一，鶴紀子(編)：事象関連電位，事象関連電位と神経情報化科学の発展，*振興医学出版社*，82-93，東京，1997.
- 11) 大熊輝雄：臨床医学第4版，*医学書院*，353-386，1999.
- 12) T.W., Picton, et.al: Guideline for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria, *Psychophysiology*, 37, 128-152, 2000.

(本学経営学部教授)

(本学経営学部)